

< 논문 >

Stereoscopic PTV 기법의 개발과 성능비교 연구

윤정환[†] · 이상준^{*}

(2005년 7월 27일 접수, 2006년 1월 20일 심사완료)

Development of Stereoscopic PTV Technique and Performance Tests

Jong-Hwan Yoon and Sang-Joon Lee

Key Words : Stereoscopic PTV(스테레오 PTV), Stereoscopic PIV(스테레오 PIV), Centroid Translation (중심점 이동), Hybrid PTV(하이브리드 PTV)

Abstract

A stereoscopic particle tracking velocimetry (SPTV) technique based on the 2-frame hybrid particle tracking velocimetry (PTV) method was developed. The expansion of 2D PTV to SPTV is facilitated by the fact that the PTV method tracks individual particle centroids. To evaluate the performance and measurement accuracy of the present SPTV technique, it was applied to flow images of rigid body translation and synthetic standard images of jet shear flow and impinging jet flow. The data processing routine and measurement uncertainty of the SPTV technique are compared with those of conventional stereoscopic particle image velocimetry (SPIV). In addition, the centroid translation effect of 2D particle image velocimetry (PIV) is defined and its effect on SPIV measurements is discussed. Compared to the SPIV method, the SPTV technique has inherited merits of concise and precise velocity evaluation procedures and provides better spatial resolution and measurement accuracy.

기호설명

X_1, Y_1 : 카메라 1의 영상면에 투영된 입자좌표
 X_2, Y_2 : 카메라 2의 영상면에 투영된 입자좌표
 x, y, z : 입자의 실제 3차원 좌표
 $F(x)$: 매핑(mapping)함수
 G : 변위 구배

1. 서론

산업 현장이나 자연현상에서 나타나는 대부분의 유동은 비정상 난류유동이기 때문에 점측정기법

(point-measurement) 기법으로는 유동의 거시적 변화를 제대로 해석할 수 없다. 최근 들어 컴퓨터 및 화상처리기법의 발달에 힘입어 기존의 점측정 기법들이 제공할 수 없는 2차원 단면, 또는 3차원 공간의 유동정보들을 제공할 수 있는 새로운 측정기법들이 개발되고 있다. 현재 세계적으로 PTV(Particle Tracking Velocimetry)와 PIV(Particle Image Velocimetry)와 같은 2차원 속도장 측정기법들이 개발되어 널리 활용되고 있다. PIV 방식은 유동화상의 미소 조사구간(interrogation window) 내에 있는 산란 입자들의 분포에 대한 상관계수를 계산함으로써 조사구간을 대표하는 속도를 구하는 반면, PTV 방식은 유동영상 속에 있는 각각의 입자위치들을 추출한 후, 그 입자 하나하나를 추적함으로써 입자변위를 결정한다.

열유체 분야에서 다루는 유동은 대부분 3차원 난류유동이므로 3차원 PIV 속도장 측정기법을 개

[†] 책임저자, 회원, 대구대학교 자동차-산업기계공학부
E-mail : jhyoon@daegu.ac.kr
TEL : (053)850-6673 FAX : (053)850-6689

^{*} 회원, 포항공과대학교 기계공학과

발하여 보다 정확한 3 차원 유동정보를 얻고자 하는 연구들이 활발히 진행되고 있다. 3 차원 체적 내부의 3 차원 속도성분을 동시에 측정할 수 있는 HPIV (Holographic PIV) 측정기법은 선진국을 중심으로 개발연구가 진행되고 있다. 그러나 아직까지 측정 시스템이 복잡하고 고가인데다 데이터 처리에 오랜 시간이 소모되는 등 많은 제한점을 가지고 있다. 2 차원 평면 내에서 3 차원 속도성분을 측정하는 SPIV(Stereoscopic PIV) 및 SPTV(Stereoscopic PTV) 측정기법^(1~11)은 HPIV 및 3-D SPTV 기법에 비해 실험이 용이하고 데이터 처리시간 짧으며, 시스템 가격이 상대적으로 저렴하다는 장점을 가지고 있다.

Soloff 등⁽⁴⁾은 2 차원 영상면과 유동 내부 3 차원 측정체적 사이의 상관관계를 보정실험을 통하여 직접 구하는 3 차원 보정기법을 개발하였다. 이 3 차원 보정기법은 영상면과 측정면사이의 기하학적인 정보를 필요로 하지 않으며, 굴절률 변화나 영상왜곡에 기인한 확대율의 공간적인 변화를 직접 측정하므로 SPIV 기법의 적용범위를 넓히는 데 크게 공헌하였다. 카메라와 렌즈, 레이저 조명과 같은 실험장치들을 실험조건과 동일하게 설치하고 보정실험을 통해 영상면과 3 차원 측정체적사이의 관계식을 구한 다음, 각 위치에서의 편미분 변수, 카메라로 측정되는 영상면 변위와 측정면 변위사이의 관계식을 구하고, 이 관계식들을 수학적으로 계산함으로써 측정면에서의 변위값을 구하게 된다.

Hill 등⁽⁵⁾은 3 차원 보정기법을 이용하여 원통형 내부에 장착된 Rushton 터빈 주위 유동을 측정하였는데, 굴절에 의한 영상 왜곡을 적절하게 보상하여 정확한 측정결과를 얻을 수 있었다.

Yoon 과 Lee⁽⁶⁾는 SPIV 와 2 차원 PIV 측정기법을 측류판 후류 유동에 동시에 적용하여 두 측정기법의 성능을 비교하였다. 레이저 평면광으로 조명한 측정평면에서의 법선 방향 속도성분에 기인한 2 차원 PIV 속도측정 기법의 오차를 SPIV 측정결과와의 차이를 이용하여 계산하고 이론적인 예상치와 비교하였다.

SPIV 기법은 2 차원 PIV 기법의 확장이기 때문에 2 차원 PIV 의 특징을 그대로 가지고 있다. PIV 기법의 경우 일반적으로 조사구간의 대표속도를 구하기 위해서는 약 5 개 이상의 추적입자가 조사구간에 있어야 한다. 반면, PTV 기법은 연속된 영상에서의 입자들의 변위를 추적하여 입자들의 속도를 직접 계산한다. 그러므로, 동일한 입자영상에서 PTV 가 PIV 에 비해 보다 많은 속도벡터들을

취득할 수 있다. 특히, PTV 는 PIV 와 달리 입자의 위치정보를 저장하고 있기 때문에 SPTV 나 3 차원 PTV 기법으로의 확장에도 유리하다.

본 논문에서는 SPTV 측정시스템의 개발과 개발된 SPTV 시스템의 정확도를 검증하고자 한다. 또한, SPTV 와 SPIV 기법의 측정정확도를 비교함으로써 SPTV 의 우수성을 확인하고, SPIV 및 PIV 방식에서 필연적으로 발생하는 중심점 이동(Centroid translation)현상을 정의하고 그로 인해 발생하는 오차를 분석하였다.

2. 하이브리드 PTV 기법을 이용한 SPTV 측정시스템 구축

본 연구에서 개발한 SPTV 측정기법은 두 대의 카메라로 기록한 입자영상의 입자변위를 구하기 위하여 2 차원 하이브리드 PTV 기법⁽⁷⁾을 적용하였다. 하이브리드 PTV 기법은 2-frame PTV⁽³⁾ 기법에 PIV 의 장점을 접목한 것이다. 기존의 2-frame PTV 는 입자추적에 사용되는 매칭변수(matching parameter) 들이 전체 입자영상에 대해 동일한 것에 비해, 하이브리드 PTV 기법은 PIV 로 미리 간단하게 측정한 값을 이용하여 국부적으로 매칭변수를 선정하는 기능이 추가되었다. 하이브리드

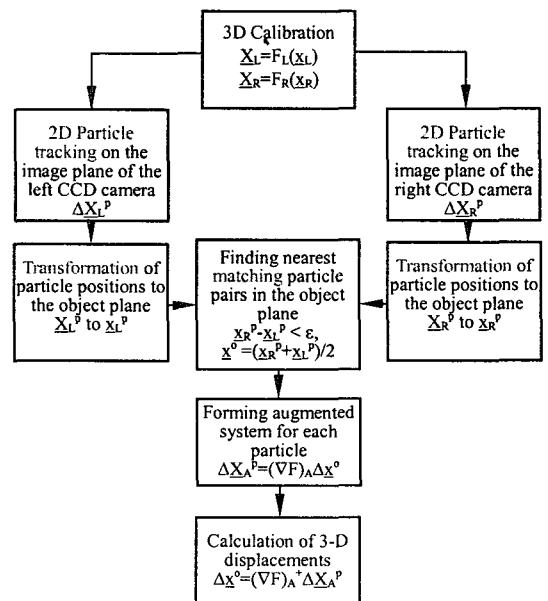


Fig. 1 Flowchart of data processing procedure of SPTV method

PTV 는 기존의 2-frame PTV 방식에 비해 보다 많은 속도벡터를 측정할 수 있으며, 높은 측정정확도를 가지는 것으로 나타났다. Fig. 1 은 개발된 SPTV 시스템의 계산과정을 보여주고 있다.

SPTV 기법에서 실제 입자변위와 영상면 변위 사이의 관계를 광로추적(ray tracing) 기법을 이용하여 구할 수 있다. 물체 평면과 두 카메라 영상면 사이의 기하학적인 관계로부터 구해진 4 개의 방정식은 3 개의 변수를 가지는 과잉해(over-determined) 시스템이 되게 된다.

SPIV 기법에서는 일반적으로 최소 자승법 (least square method)을 이용하여 4 개의 방정식을 만족하는 가장 근사한 입자변위 Δx , Δy , Δz 값을 구하거나, 두 식을 평균하여 방정식의 개수를 줄이는 방법을 이용하여 해(solution)를 구한다. 액체유동의 속도장 측정과 같이 빛의 굴절률이 액체와 공기의 경계면에서 변화하거나 영상의 왜곡이 심한 경우, 확대율이 좌표위치에 따라 일정하지 않다. 이 경우 광로추적 기법을 이용하여 간단한 계산과정을 통해 변위를 측정하면 측정오차를 유발하게 된다. 본 연구에서는 각변위(angular displacement)방식으로 카메라를 배치하고 Soloff 등⁽⁴⁾이 개발한 3 차원 보정기법을 적용하여 굴절을 변화를 보정하였다. 3 차원 측정면과 영상면사이의 관계식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\mathbf{X} = \mathbf{F}(\mathbf{x}) \tag{1}$$

$\mathbf{X} = (X_1, Y_1, X_2, Y_2)$ 는 투영된 영상면에서의 좌표를 나타내며, $\mathbf{x} = (x, y, z)$ 는 측정체적 내부 실제 좌표를 나타낸다. 본 연구에서는 x 와 y 좌표의 3 차식, z 의 2 차식으로 매핑함수 $\mathbf{F}(\mathbf{x})$ 를 근사하였다.

영상면의 입자변위 $\Delta \mathbf{X}$ 는 $\nabla \mathbf{F}(\mathbf{x}) \cdot \Delta \mathbf{x}$ 로 표현되며, $\nabla \mathbf{F}(\mathbf{x})$ 는 매핑함수 $\mathbf{F}(\mathbf{x})$ 로부터 간단히 계산하거나 실제 측정할 수 있는 값이다. 그러므로, 입자 변위 (Δx , Δy , Δz)에 관한 4 개의 방정식을 이용하여 3 차원 속도성분을 계산할 수 있다. 4 개의 식에서 3 개의 변수를 구하기 위하여 최소자승법(least square fitting)을 적용할 수도 있으나, 본 연구에서는 ΔY_1 과 ΔY_2 에 관한 두 식을 평균하여 간단하고 보다 정확하게 3 차원 변위를 계산하였다.

3. SPTV 기법의 정확성 검증

3.1 강제병진(rigid body translation)

SPTV 기법의 정확성을 검증하기 위하여 강제병

진(rigid body translation) 측정에 SPTV 기법을 적용하였다. 직경 0.5 mm 의 흰색 점들이 2.5 mm 간격으로 정교하게 인쇄된 옥면체 형태의 보정판을 이송장치에 부착하고 일정한 방향으로 이송하면서 보정판의 입자영상을 취득하였다. 보정판을 250 μ m 간격으로 이송하였으며, 원 위치의 초기영상을 포함하여 7 개 지점에서의 영상을 취득하였으며, 이를 이용하여 6 세트의 변위정보를 측정하였다. Fig. 2 는 강제병진 측정에 사용된 SPTV 시스템의 개략도를 나타내고 있다.

강제병진 거동에 대한 측정결과를 Fig. 3 에 나타내었다. 동일한 입자영상에 SPTV 와 SPIV (32 \times 32, 64 \times 64 픽셀 조사구간) 기법을 적용하여 두 가지 측정기법을 비교하였다. 이때, 입자밀도는 약 1×10^3 (particles/pixel²) 이다. 측정결과 SPTV 의 계통오차는 최대 약 1.5%인 것에 비해, 64 \times 64 픽셀 조사구간을 적용한 SPIV 는 약 2.5%, 32 \times 32 픽셀 조사구간의 SPIV 의 계통오차는 약 4%로 큰 값을 가지는 것으로 나타났다. SPIV 기법의 경우 조사구간이 작아짐에 따라 계통오차가 증가하는 것은 조사구간 내부에 존재하는 입자수가 감소하여 충분한 SNR (Signal to Noise Ratio)을 확보하지 못하기 때문으로 사료된다. 3 가지 측정결과를 비교해보면 공통적으로 계통오차는 z 축 방향의 이송거리에 크게 영향을 받지 않고 일정 수준의 값을 유지하고 있음을 확인할 수 있다.

우연오차의 경우, SPTV 가 SPIV 에 비해 약 1/2 정도인 1% 미만으로 우수한 정확도를 가지는 것으로 나타났다. 우연오차는 계통오차와 달리 z 축 방향으로 이송거리가 작을 때($z < 0.5$ mm) 큰 오차

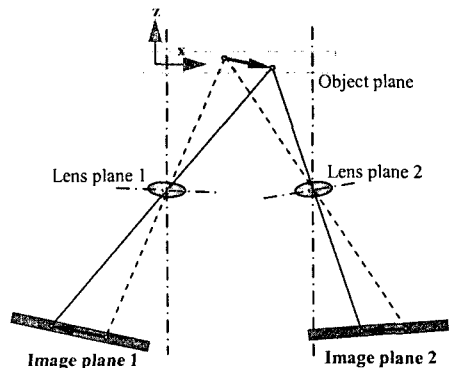


Fig. 2 Schematic diagram of SPTV system in the rigid body translation measurement

가 발생하는 경향을 보인다. 이것은 PIV의 최대치 검출(peak detection)과정이나 PTV의 입자중심 검출(centroid detection)과정에서 어느 정도의 일정한 오차가 항상 존재하기 때문이며, z축 방향의 변위가 작은 경우 분모인 측정변위가 감소하기 때문에 상대오차가 크게 나타나는 것으로 생각된다.

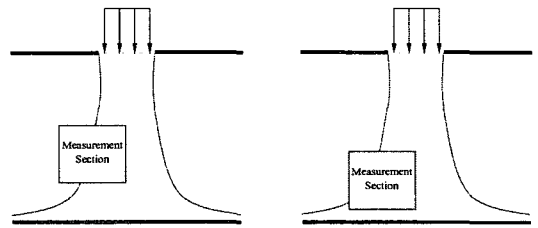
계통오차와 우연오차 두 결과 모두 z방향 속도 성분(w)의 오차가 전체적으로 큰 것으로 나타났는데, 이는 본 연구에서 적용한 카메라 설정에 기인한 것으로 보인다. 본 연구에서 카메라 렌즈의 측정각도는 약 30°이며, Lawson과 Wu⁽⁸⁾의 연구에 따르면 이러한 조건에서 z방향 속도 성분(w)의 오차가 가장 크게 발생하는 것으로 예측되어진다.

강체병진 거동에 대한 계통오차 및 우연오차 성능비교 연구로부터 기존의 SPIV에 비해 SPTV 기법의 성능이 우수한 것을 확인하였다.

3.2 VSJ 표준영상

본 연구에서는 일본가시화학회(VSJ, Visualization Society of Japan)에서 제공하는 표준영상을 이용하

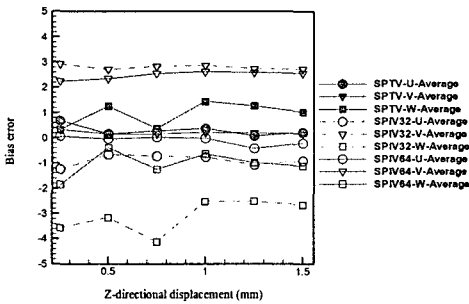
여 개발된 SPTV 기법의 성능과 측정 정확도를 점검하였다. Fig. 4은 성능비교에 사용된 VSJ 표준영상의 유동조건을 나타낸 그림이다. 제트 전단유동과 충돌제트유동을 수치적으로 모사한 LES (Large Eddy Simulation) 결과를 채용하였으며, 두 경우 모



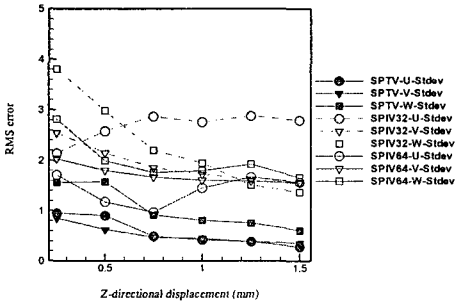
(a) Jet shear flow

(b) Impinging jet flow

Fig. 4 Schematic diagram of flow conditions of VSJ standard particle images

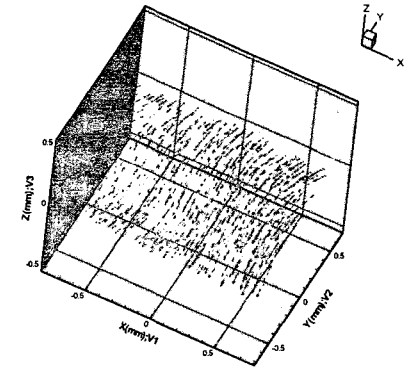


(a) Bias error

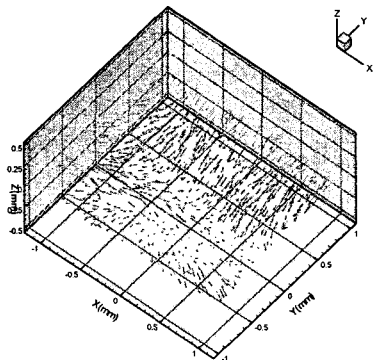


(b) RMS error

Fig. 3 Comparison of measurement errors in the rigid body translation measurements using SPIV and SPTV



(a) Jet shear flow



(b) Impinging jet flow

Fig. 5 Instantaneous velocity vectors measured by SPTV

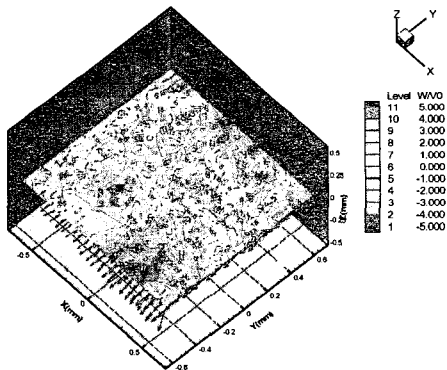
두 제트유동의 레이놀즈 수는 $Re=3000$ 이며, 입자영상의 크기는 8 비트의 256×256 픽셀이다.

Fig. 5 는 VSJ 표준영상에 대해 SPTV 기법을 적용하여 측정된 순간 속도장 결과를 나타내고 있다. 제트 전단유동의 경우, 순간 속도장 결과에서 추출한 벡터의 수는 약 1000 이상으로, 공간분해능 (spatial resolution)은 약 8.09 픽셀 이하이었다. 그리고, 충돌제트의 경우 순간 속도장 결과에서 획득한 공간분해능은 약 6.61 픽셀 미만이었다. 일반적으로 SPIV 기법의 공간분해능은 최소 16 픽셀 이상이기 때문에 SPTV 기법의 공간분해능이 상대적으로 우수함을 확인하였다. 이러한 결과는 2 차원 하이브리드 PTV 기법의 뛰어난 속도벡터 추출성능과 우수한 공간분해능에 기인한 것으로 판단된다.

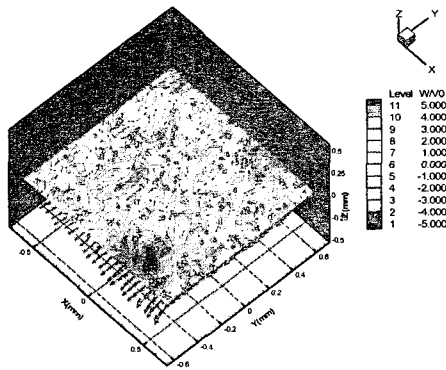
140 개의 제트 전단유동 순간 속도장 측정결과

와 200 개의 충돌제트유동 순간 속도장 측정결과를 시간평균하여 평균 속도장 및 난류성분을 측정하였다. SPTV 로 측정된 제트 전단유동의 평균 속도장 결과와 LES 수치해석으로 구한 평균 속도장 결과를 Fig. 6 에서 비교하여 나타내었다. 평면내부 (in-plane) 속도성분 (u,v)은 벡터로 나타내고, 평면에 수직한 속도성분 (w)은 윤곽선 (contour)으로 표현하였다. 비교 결과, SPTV 결과와 LES 결과가 측정구간 전반에서 거의 동일한 값을 보여주고 있다. 단지 오른쪽 하단부분에서 일부 일치하지 않는 부분이 관찰되는데 이는 SPTV 보정과정과 매핑과정에서 발생한 오차로 생각된다.

VSJ 표준영상을 이용한 측정정확도 확인을 통해 SPTV 기법의 공간해상도가 SPIV 에 비해 우수함을 확인하였으며, 평균속도는 약 0.4% 이하, 난류강도는 0.5%이하의 오차를 가지는 것으로 나타났다.



(a) SPTV result



(b) LES result

Fig. 6 Mean in-plane velocity vectors and out-of-plane velocity contours of the jet shear flow

4. 중심점 이동에 따른 SPIV 의 오차발생

4.1 중심점 이동현상

Fig. 7 는 2 차원 PIV 기법에서 발생하는 중심점 이동 (centroid translation) 현상을 나타낸 그림이다. 대부분의 PIV 기법은 속도벡터의 위치를 조사구간의 중심에 표시한다. 그러므로, 실제 추적입자의 위치와 속도가 표시되는 위치의 차이가 발생한다. 이러한 입자위치의 차이를 중심점 이동 (centroid translation)이라고 정의하고, 그 최대크기는 조사구간의 폭과 높이에 비례한다.

PIV 측정에서 중심점 이동 현상이 항상 발생하는 것에 비해 PTV 기법에서는 입자의 중심좌표를 정확하게 계측할 수 있는 장점을 가지고 있다. 이러한 PTV 기법의 장점은 2 차원 속도장 계측에

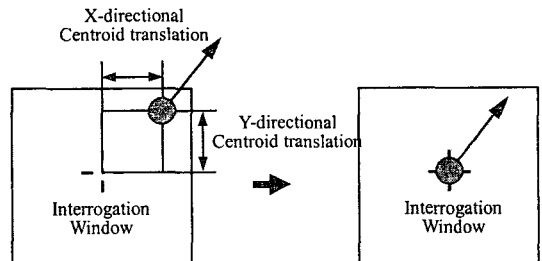


Fig. 7 Translation of particle centroid to the center of interrogation window in 2D PIV

서는 크게 드러나지 않지만 SPTV 속도측정에서는 측정오차를 줄일 수 있는 중요한 요인으로 작용한다.

4.2 중심점 이동에 기인한 오차

본 연구에서는 중심점 이동의 크기와 속도구배를 변화시키며 2 차원 PIV 결과를 생성시켜 중심점 이동에 기인한 SPIV 기법의 에서 발생하는 오차를 조사하였다. PIV 조사구간의 크기는 32×32 픽셀이며, 최대 변위를 15 픽셀로 설정하였다. 조사구간내부에서의 x 축 및 y 축 방향 변위는 다음과 같이 설정하였다.

$$\begin{aligned} \Delta X &= G_1 X + C_1 \\ \Delta Y &= G_2 Y + C_2 \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, G 는 변위구배로써 조사구간내부에서의 변위가 위치에 따라 변화하는 양을 나타내며, C 는 임의의 상수를 나타낸다. Fig. 8 (a)는 중심점 이동이 없는 경우의 PIV 결과이며, Fig. 8 (b)는 Fig. 8 (a)의 결과를 x 축 및 y 축 방향으로 15 픽셀 이동한 결과를 나타낸다.

Fig. 9 는 중심점 이동이 없는 초기 PIV 결과를 이용하여 계산한 3 차원 SPIV 결과를 보여주고 있다.

Fig. 10 는 중심점 이동 및 변위구배(G)의 변화에 따른 퍼센트 상대오차 $[(U_{moved}-U_{fixed})/U_{max}] \times 100$ 를 나타내고 있다. 여기서, U_{moved} 는 중심점 이동이 있는 경우의 속도이며, U_{fixed} 는 중심점 이동이 없는 초기 속도를 의미한다. Fig. 10 에 나타낸 상대오차 결과를 살펴보면 예상한 바와 같이 중심점

이동과 변위구배(G)가 증가함에 따라 오차가 선형적으로 증가하는 것으로 나타났다. 변위구배가 없을 때 측정된 결과가 실제 변위라고 가정한다면, 최대오차는 약 5.9% 정도로 상대적으로 큰 값을 가진다.

2 차원 PIV 및 SPIV 기법의 경우, 중심점 이동에 기인하여 상대적으로 큰 오차가 필연적으로 발생한다. 따라서 SPTV 기법이 측정 정확도측면에서 비교우위에 있음을 알 수 있다. 반면, 이러한 영향은 입자밀도가 증가할수록 감소할 것으로 예상할 수 있다.

5. 결론

(1) 2 차원 하이브리드 PTV 기법에 기초하여 새로운 3 차원 SPTV 기법을 개발하였다.

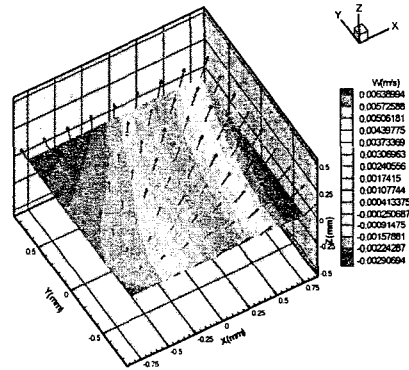
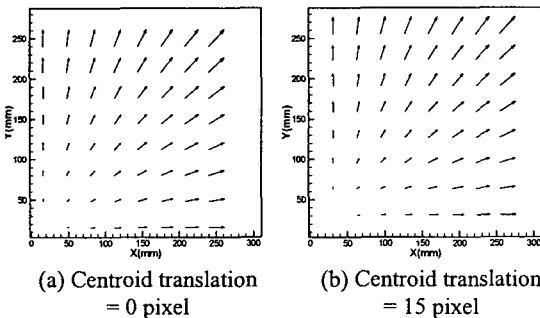
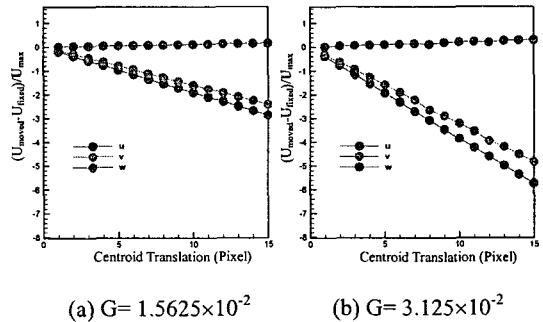


Fig. 9 In-plane velocity vectors and out-of-plane velocity contour obtained by SPIV method(centroid translation = 0 pixel)



(a) Centroid translation = 0 pixel (b) Centroid translation = 15 pixel

Fig. 8 Comparison of Virtual 2D PIV velocity vectors for different centroid translations



(a) $G = 1.5625 \times 10^{-2}$ (b) $G = 3.125 \times 10^{-2}$
Fig. 10 Velocity difference $((U_{moved}-U_{fixed})/U_{max} \times 100)$ of SPIV measurements with respect to centroid translation and displacement gradient

(2) 개발된 SPTV 기법을 강체병진거동에 적용하여 계통오차 및 우연오차 측면에서 SPIV 에 비해 SPTV 기법의 성능의 우수성을 확인하였다.

(3) SPTV 기법을 VSJ 표준영상에 적용하여 공간 분해능과 측정 정확도가 SPIV 에 비해 우수함을 확인하였다. SPTV 기법은 평균속도 0.4%, 난류강도 0.5%의 작은 측정오차를 가지는 것으로 나타났다.

(4) SPIV 기법에서 필연적으로 발생하는 중심점 이동 현상에 기인한 오차를 분석한 결과, 최대 약 5.9% 의 상대오차가 발생하였다.

(5) SPIV 의 경우, 중심점 이동에 기인한 오차가 필연적으로 발생하기 때문에 SPTV 기법이 측정 정확도 측면에서 비교우위가 있다.

참고문헌

- (1) Virant, M. and Dracos, T. H., 1997, "3D PTV and its Application on Lagrangian Motion," *Measurement Science Technology*, Vol. 8, pp. 1539~1552.
- (2) Doh, D. H., Hwang, T. G. and Saga, T., 2004, "3-D-PTV Measurements of the Wake of a Sphere," *Measurement Science Technology*, Vol. 15, pp. 1059~1066.
- (3) Baek, S. J. and Lee, S. J., 1996, "A New Two-Frame Particle Tracking Algorithm Using Match Probability," *Experiments in Fluids*, Vol. 22, pp. 23~32.
- (4) Soloff, S. M., Adrian, R. J. and Liu, Z.-C., 1997, "Distortion Compensation for Generalized Stereoscopic Particle Image Velocimetry," *Measurement Science Technology*, Vol. 15, pp. 1441~1454.
- (5) Hill, D. F., Sharp, K. V. and Adrian, R. J., 2000, "Stereoscopic Particle Image Velocimetry Measurements of the Flow Around a Rushton Turbine," *Experiments in Fluids*, Vol. 29, pp. 478~485.
- (6) Yoon, J. H. and Lee, S. J., 2003, "Direct Comparison of 2-D PIV and Stereoscopic PIV Measurements," *Measurement Science Technology*, Vol. 13, pp. 1631~1642.
- (7) Kim, H. B. and Lee, S. J., 2003, "Performance Improvement of Two-Frame Particle Tracking Velocimetry Using a Hybrid Adaptive Scheme," *Measurement Science Technology*, Vol. 13, pp. 573~582.
- (8) Lawson, N. J. and Wu, J., 1997, "Three-dimensional Particle Image Velocimetry: Error Analysis of Stereoscopic Techniques," *Measurement Science Technology*, Vol. 8, pp. 894~900.
- (9) Prasad, A. K., 2000, "Stereoscopic Particle Image Velocimetry," *Experiments in Fluids*, Vol. 29, pp. 103~116.
- (10) Yoon, J. H. and Lee, S. J., 2003, "Investigation of Near-field Structure of an Elliptic Jet Using a Stereoscopic PIV," *Measurement Science Technology*, Vol. 14, pp. 2034~2046.
- (11) Doh, D. H., Lee, W. J., Cho, Y. B. and Pyeon, Y. B., 2002, "High-Definition Stereoscopic PTV," *Proceeding of KSME Autumn Conference*, pp. 2145~2149.